

氏 名	中 村 静 香
授 与 学 位	博 士 ( 工 学 )
学 位 授 与 年 月 日	平 成 7 年 9 月 13 日
学 位 授 与 の 根 拠 法 規	学 位 規 則 第 4 条 第 2 項
最 終 学 歴	昭 和 48 年 3 月 成蹊大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了
学 位 論 文 題 目	電力系統事故発生後の系統復旧操作を支援する方法に関する研究
論 文 審 査 委 員	東北大学教授 豊田 淳一 東北大学教授 阿部 健一 東北大学教授 阿曾 弘具 東北大学助教授 斎藤 浩海

## 論 文 内 容 要 旨

我が国の電力系統は、その経済発展に伴って系統規模を飛躍的に増大させると共に、その信頼性においても、電力機器の着実な技術進歩ならびに電子技術の積極的な導入により目覚ましい発展をとげて来た。また、この過程において、電力は利便性の高いエネルギー源として社会の重要なインフラストラクチャーの1つとしての地位を確立し、益々その高い供給信頼性（低停電頻度、短時間復旧）を要求されるものとなって来ている。

ところで、近年の電力系統をとりまく状況は、系統の巨大化、立地・環境問題に起因する電源の遠隔化等により、系統運用そのものが難しいものとなる一方において、電力機器の高信頼度化に伴う系統運用者の事故経験の減少といった、万一の電力系統事故に対する系統運用者の対応能力を低下させる様々な要因を内包し始めている。

電力系統にひとたび事故が発生すると、系統運用者は速やかに「停電範囲の把握」、「事故設備の把握」、「負荷の予測」、「復旧目標系統（復旧操作により到達したい系統状態）の立案」、「復旧操作手順（復旧目標系統が示す系統状態に到達するための操作手順）の立案」を行い、実際の復旧操作に入ることが求められる。しかも、これらの知的な業務を事故に関わる関係各所への連絡等の輻輳する業務の中で迅速・的確に行わなければならないため、経験豊かな系統運用者にとっても、系統事故時の精神的負荷は非常に大きなものとなる。

一方、電力機器の信頼性向上にも係わらず、面的な広がりを持つ電力系統があらゆる自然現象に対して万全であるということはありません。寒波、台風、磁気嵐といった自然現象に起因する大停電が世界各地で引き続き発生しており、今後とも、停電事故を皆無にすることは不可能と考えられる。

このようなニーズ面からの背景と、計算機能力の飛躍的な向上ならびに各種の組合せ最適化手法の出現というシーズ面からの背景から、電力系統に事故が発生した場合の復旧操作を迅速・的確に支援する、あるいは自動化するシステムの出現が現実味を持って強く求められ始めている。

このようなシステムを実現するにあたっての技術課題は、「停電範囲の把握」、「事故設備の把握」、「負荷の予測」、「復旧目標系統の立案」「復旧操作手順の立案」、「系統運用者と計算機との対話方法」のそれぞれについての方法論を確立することにあるが、これらの内、特に「復旧目標系統の立案」と「復旧操作手順の立案」という2つの技術課題の克服が難しいために、電力系統事故時の復旧操作を支援するシステムの実系統への導入は遅れ、一部の系統で試行が始まったのはここ数年のことであり、現在もこれらの技術課題に対する研究が精力的に続けられている。

電力系統事故時復旧操作支援システムを実現するための第一の技術課題は前述の通り復旧目標系統の立案問題であり、復旧操作後に残る供給支障量、復旧操作のための開閉器操作コスト、発電機出力変更コスト、等から成る評価関数値を最小化する復旧操作後の系統状態を発見しようとする問題となっている。

この問題は、開閉器の開閉状態の決定のみに着目したとしても、電力系統の開閉器の数を  $N$  とするとき、電力系統のとりうる  $2^N$  の組合せの中から最適な（あるいは準最適な）組合せを発見しようとする組合せ最適化問題となっており、電力系統の運用を行う給電所が一般に数百から数千の開閉器を制御対象としていることを考え合わせると、この  $2^N$  という膨大な組合せの全てについて調べつくすといったアプローチによってはとうてい解き得ない大型の組合せ最適化問題になっていることが判る。

第2の技術課題は、前述の通り復旧操作手順の立案問題であり、復旧目標系統が示す系統の状態に到達するために必要となる開閉器や発電機に対する操作内容とその順序を決定しようとする問題となっている。

復旧目標系統と事故後の系統との間に開閉状態の異なる開閉器が  $M$  個存在し、この  $M$  個の開閉器の開閉状態をどういう順序で反転させていけば良いかを決定する単純な復旧操作手順の立案問題を考えた場合でも、その組合せ数は  $M!$  となり、現実の復旧操作における  $M$  が数十に達し得ることを考え合わせると、この問題も復旧目標系統の立案と同様に容易には解き得ない大型の組合せ最適化問題になっていることが判る。

組合せ最適化問題の解法としては、数理計画法によるアプローチ、ホップフィールド型ニューラルネットワーク・ボルツマンマシン等の回路網のエネルギーの最小化を利用するアプローチ、金属の焼きなまし時のエネルギーの極小化をモデル化し利用するシミュレーテッドアニーリングによるアプローチ、交配・自然淘汰・突然変異により環境に適合して行く生物の遺伝メカニズムをモデル化し利用するジェネティックアルゴリズムによるアプローチ等が知られているが、実用レベルの大型の組合せ最適化問題に対し適用可能な汎用的な手法は現在存在していない。

また、ここで扱う電力系統事故時の復旧操作支援問題が一刻を争う問題であることより、復旧目標系統の立案問題ならびに復旧操作手順の立案問題を高速に扱い得る新しい組合せ最適化問題の解法の開発が強く求められている。

本研究は、このような背景から、電力系統事故時復旧操作支援問題の中で最も難しい2つの部分問題、すなわち、復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題とを組合せ最適化問題として解く実用に耐える解法を得ることを目的に行われた。

本論文は以下に示す各章から構成されている。

第2章では、電力系統事故時復旧操作支援問題の中で最も難しい2つの部分問題、すなわち、復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題との組合せ最適化問題としての大きさ（組合せ数）を示し、電力系統事故時復旧操作支援問題をこの2つの部分問題に分割せずに扱う場合の組合せ数と比較することにより、電力系統事故時復旧操作支援問題を復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題とに分割して扱うことの合理性を示す。また、このように問題を分割して扱うことにより、復旧目標系統の立案ならびに復旧操作手順の立案のそれぞれの終了時点において、系統運用者による復旧目標系統ならびに復旧操作手順の変更が可能となり、対話性に優れた電力系統事故時復旧操作支援システムの構築が可能となることを示す。このように電力系統事故時復旧操作支援問題を復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題とに分割して扱うことにより対話性に優れた電力系統事故時復旧操作支援システムの構築が可能となるという提案は、筆者らによる提案以来、電力系統事故時復旧操作支援システムの基本的な実現方法として広く認められている。

また、第2章では明確な定式化が行われていない上述の2つの部分問題を厳密に組合せ最適化問題として定式化し、本論文が扱おうとする問題を明確化する。

第3章では、電力系統事故時復旧操作支援問題への適用という観点から、組合せ最適化手法に対する諸要求を明らかにし、既存の代表的な組合せ最適化手法である整数計画法等の数理画法によるアプローチ、ホップフィールド型ニューラルネットワークによるアプローチ、シミュレーテッドアニーリングによるアプローチ、ジェネティックアルゴリズムによるアプローチ、エキスパートシステムによるアプローチとを概観することにより、既存の組合せ最適化手法の中にこれらの諸要求の全てを満たす手法が存在せず、新たな組合せ最適化手法の開発が求められることを示す。

第4章では、前章で明らかになった諸要求の全てを満たす組合せ最適化手法（問題空間探索法の一つ）を提案し、NP困難問題の代表例である巡回セールスマン問題を例にとり、その有効性を示す。この組合せ最適化手法は、問題空間（組合せ最適化問題の各組合せで構成される空間）を最急降下方向に探索し、極小解への到達により上記の探索が停留する場合には、この極小解に対する評価関数値の増大を行い最急降下方向への探索を継続しようとするものであり、探索の早い段階から良質の解が得られる、十分な探索を行うことにより最適解の発見が保証される、処理時間・必要記憶容量が共に探索回数の1次比例に留まる、といった特長を持っている。なお、この組合せ最適化手法は既に米国特許を

獲得している (No.5301256, State Space Search System, 1994年4月5日成立)。

第5章では、前章で提案した新しい組合せ最適化手法を、電力系統事故時復旧操作支援問題の中で最も難しい2つの部分問題、すなわち、復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題へと適用する具体的な方法について述べ、さらに、提案手法の実用例としての関西電力基幹系統給電所運転支援システムによる処理結果を示すことにより、200ノードを超える実系統データに対する復旧目標系統ならびに復旧操作手順の立案が、数十秒という充分実用的な時間で可能であることを示す。

第6章は本研究論文の結論であり、各章で得られた結果から、従来は不可能と考えられてきた「電力系統事故時復旧操作支援問題を組合せ最適化問題として扱うこと」が充分可能であり、従来のエキスパートシステムによるアプローチに比べ、ソフトウェアの開発・維持がはるかに容易になる、開発したソフトウェアを他の電力系統へ適用することが容易になる、エキスパートシステムに見られるような使用した知識の普遍性に関する不安がない、といった多くの長所を持つことを示す。

また、第6章では本研究が取り扱わなかった今後に残された研究課題、すなわち、電圧・無効電力問題、安定度問題、復旧後の系統信頼度問題、全系停電問題について述べ、さらに、それらの研究課題の解決の方向性を示す。

## 審査結果の要旨

電力系統に事故が発生すると、系統運用者は停電範囲と事故設備を把握し負荷の予測を行い復旧操作に入るが、事故に係わる関係各所への連絡等輻湊する業務の中で迅速かつ確な処理を行う必要があるため、組織的な手法の開発が求められている。

著者は、電力系統に事故が発生した後の系統復旧操作を支援し、自動化する方法について一連の開発研究を行った。本論文は、これらの成果をまとめたもので全編6章よりなる。

第1章は序論である。

第2章では、事故時復旧操作支援問題を、復旧操作により最終的に到達したい系統の復旧目標状態を決定する問題と事故後の系統状態から復旧目標系統に到達するために必要となる操作手順を決定する問題に分けて扱うという問題解決の方法を示すとともに、これらの部分問題がともに組み合わせ最適化問題として定式化されることを示している。

第3章では、事故時復旧操作の問題解決に要求される手法の要件を検討し、既存の組み合わせ最適化手法の中に要求されるすべての性質を満たす手法が存在せず、とくに多峰性問題の解決に優れた手法開発が必要なことを論じている。

第4章では、問題解決手法の要件を満たす新しい組み合わせ最適化手法を提案している。これは、問題空間探索法を拡張した手法であり、準最適解を逐次に効率的に探索する特長がある。必要計算量が問題規模の多項式では表現できないNP困難問題の代表例である巡回セールスマン問題に提案手法を適用した結果、最適解が多数存在する36都市問題について、提案手法が局所解からの脱出能力と複数最適解の探索能力に優れていることを示している。これは有用な成果である。

第5章では、前章で提案した新しい組み合わせ最適化手法を事故時復旧操作支援問題の2つの部分問題、すなわち、復旧目標系統立案問題と復旧操作手順立案問題に適用する方法について述べている。さらに、提案手法を系統縮約後でも200ノード、357ブランチに達する関西電力基幹系統給電所の実規模システムに適用した結果、短時間で最適解が得られたことを述べている。これは実用上重要な成果である。

第6章は結論である。

以上要するに本論文は、新しい組み合わせ最適化手法を用いた電力系統の事故発生後の復旧操作を支援する方法に関して開発研究を行い、電力系統の安全運用に有用な知見を加えたものであり、電力システム工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。